

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Подворного Андрія Володимировича**

**«Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних  
циліндричних оболонок в просторовій постановці»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.23.17 – Будівельна механіка

Роботу присвячено розв'язанню важливої науково-технічної проблеми: створення на основі просторових співвідношень лінійної теорії пружності алгоритмів і розрахункових моделей для проведення досліджень напружено-деформованого стану, параметрів вільних коливань товстостінних і стійкості нетонких шаруватих конструктивно анізотропних циліндричних оболонок із композитних матеріалів, що знаходяться в полі різноманітних силових дій та температурного впливу.

### **1. Актуальність обраної теми дисертації.**

Зменшення матеріаломісткості циліндричних оболонкових конструктивних елементів із забезпеченням умов їх надійної експлуатації досить часто пов'язано із використанням композитних матеріалів. Це питання стає особливо важливим у зв'язку із можливим застосуванням конструктивно анізотропних композитних оболонкових систем в авіаційній, ракетній, космічній галузях, а також в машинобудуванні та будівництві. Їх розрахунки щодо встановлення характеристик деформування, динаміки та стійкості, які здійснюються на основі відомих двовимірних моделей не завжди задовольняють вимогам стосовно їх точності. Тому логічним і важливим є побудова розрахункових моделей, що дозволяють найбільш повно враховувати параметри, які описують напружено-деформований стан, коливання та стійкість цих оболонок.

Розв'язання проблем розрахунків циліндричних конструктивно анізотропних композитних оболонок може бути пов'язане з використанням просторових співвідношень лінійної теорії пружності. В них же слід враховувати, що при виготовленні таких оболонкових систем, наприклад, шляхом укладання на оправку попередньо ортотропного волокнистого матеріалу в конструкції він отримує властивості більш низького порядку симетрії пружних характеристик. Тобто, на макрорівні утворюється матеріал, що має одну

площину пружної симетрії, яка є паралельною серединній поверхні оболонки. Відповідно до узагальненого закону Гука деформації розтягу (стиску), зсуву, згину та кручення конструкцій стають взаємопов'язаними. Зазначене суттєво ускладнює розрахунки оболонкових конструкцій в порівнянні з тими, що виготовлені, наприклад, із ортотропного матеріалу.

Відомо, що традиційні композитні матеріали не завжди здатні використовуватись в умовах високих температур. Тому для їх захисту може використовуватися новий клас композитних матеріалів, відомий як функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ). Відомо, що типовий ФГМ є неоднорідним за товщиною композитом і виготовленим з різних фаз матеріальних складових, як правило, кераміки й металів або наноматеріалів. Завдяки неперервно змінним за товщиною властивостям такий матеріал здатний протистояти високотемпературному впливу, забезпечувати необхідні пружні характеристики основної несучої конструкції і, в той же час, позбавлений небажаних ефектів концентрації напружень і розривів на поверхнях контакту. Дослідження напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій виготовлених з традиційних композитів, захищених з боку високотемпературних полів шарами функціонально-градієнтних матеріалів, також раціонально проводити в рамках співвідношень тривимірної теорії пружності.

Підсумовуючи, можливо зауважити, що проблеми тривимірного розрахунку напружено-деформованого стану, коливань товстостінних і стійкості нетонких конструктивно анізотропних циліндричних оболонок є недостатньо вивченими. З огляду на це, поставлені та розв'язані в дисертаційній роботі проблеми є важливими для розвитку розрахунків композитних конструкцій, а також актуальними й такими, що мають як наукове, так і прикладне значення.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації, їх новизна і загальнонаціональне або світове значення, повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено її зв'язок із науковими програмами. Сформульовано мету й задачі дослідження. Вказано об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача. Вказано, що автор брав участь у виконанні

держбюджетних наукових тем за планами МОН України, будучи керівником однієї та відповідальним виконавцем ще однієї з них.

**В огляді літератури** аналізується сучасний стан досліджень напружено-деформованого стану, динаміки товстостінних і стійкості нетонких оболонкових конструкцій в тривимірній постановці та наведено обґрунтування теми дисертаційної роботи.

**У першому розділі** побудовано модифікований варіаційний принцип Ху-Васідзу і на його основі виведено тривимірну систему з шести неоднорідних диференціальних рівнянь руху лінійної теорії пружності. Отримана таким чином система може бути використана для визначення параметрів напружено-деформованого стану від силового та/або температурного впливу та частот вільних коливань анізотропних товстостінних композитних циліндричних оболонок.

**У другому розділі** подається підхід до розв'язання задачі про напружено-деформований стан товстостінної шаруватої анізотропної циліндричної оболонкової конструкції в просторовій постановці під зовнішнім осесиметричним силовим впливом на неї. У випадку розподіленого зовнішнього бокового тиску для зменшення розмірності тривимірної системи рівнянь рівноваги при відповідних умовах на поверхнях і торцях оболонки використовується аналітичний метод Бубнова – Гальоркіна. При осьовому стисканні та крученні з цією ж метою використовується чисельний метод прямих. Для розв'язання отриманих одновимірних задач в напрямку нормалі до серединної поверхні оболонки використовується метод дискретної ортогоналізації.

Проаналізовано напружено-деформований стан анізотропних циліндричних оболонок при боковому, осьовому стисканні, крученні в залежності від кута повороту головних напрямів пружності волокнистого композиту відносно твірної циліндра для різної структури шаруватого пакету, геометрії та граничних умов на торцях. Проведено порівняння з результатами, отриманими за допомогою моделі ортотропного матеріалу при розрахунку анізотропних циліндричних оболонок.

**В третьому розділі** за використанням системи диференціальних рівнянь тривимірної лінійної теорії пружності анізотропного тіла, що виведена в першому розділі, представлено підхід та результати розв'язання задачі про напружено-деформований стан від дії змінного за товщиною температурного

впливу, а також силової дії для циліндричних товстостінних шаруватих оболонок, виготовлених з композитних та функціонально-градієнтних матеріалів, що мають одну площину пружної симетрії, паралельну серединній поверхні конструкції, в просторовій постановці. Наведено результати розв'язання задач для двох типів структури ФГМ - кераміко-металевої та нанокерамічної.

**В четвертому розділі**, спираючись на систему диференціальних рівнянь тривимірної постановки, що отримана в першому розділі, запропоновано підхід до розв'язання задачі про вільні коливання шаруватих товстостінних циліндричних оболонок з анізотропного матеріалу в просторовій постановці. Для зменшення розмірності системи застосовано аналітичний метод Бубнова-Гальоркіна. Отримана таким чином одновимірною задачею реалізована чисельним методом дискретної ортогоналізації. Наведено результати розрахунку частот вільних коливань циліндричних оболонок з композитів з косоперехресним укладанням шарів армованого матеріалу та з ФГМ, що мають одну площину пружної симетрії паралельну серединній поверхні конструкції. Проаналізовано вплив різних схем армування, структурної конфігурації пакету шарів, товщини та довжини, умов закріплення торців на частоти вільних коливань анізотропних циліндричних оболонкових конструкцій.

**У п'ятому розділі**, спираючись на модифікований варіаційний принцип Ху-Васідзу в рамках теорії пружності анізотропного тіла, отримана, в частинних похідних, тривимірною системою однорідних диференціальних рівнянь стійкості, що записана в циліндричній системі координат. Для зменшення її розмірності використовується процедура методу Бубнова-Гальоркіна. Чисельна реалізація одновимірною однорідною системою диференціальних рівнянь, що описує задачу стійкості нетонких циліндричних анізотропних оболонок, проводиться за використанням методу дискретної ортогоналізації.

**Шостий розділ** представляє результати розрахунку на стійкість циліндричних оболонкових конструкцій з композитів, утворених косоперехресним укладанням армованих волокнистими матеріалами шарів та з ФГМ, що мають одну площину пружної симетрії паралельну серединній поверхні конструкції. Розглянуто такі випадки стискального навантаження: зовнішній бокове стискання, осьове стискання, а також торцеве зсувне навантаження (крутний момент). Досліджено вплив анізотропії матеріалу розглянутого виду на критичні величини навантажень за умови зміни кількості

шарів, кута їх армування та товщини циліндричних оболонкових конструкцій в просторовій постановці.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації базуються:**

- на аналізі літературних джерел за даною проблемою, коректній постановці мети та задач дослідження;
- застосуванням надійних і детально апробованих методів аналітичного та чисельного інтегрування при розв'язанні однорідних і неоднорідних систем диференціальних рівнянь;
- на співставленні отриманих результатів з результатами інших досліджень та даними експериментів.

### **3. Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації**

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні розрахункової моделі та проведенні дослідження напружено-деформованого стану (від силового, температурного й термосилового впливу) та параметрів вільних коливань товстостінних і стійкості нетонких анізотропних циліндричних композитних шаруватих оболонок, матеріал яких має одну площину пружної симетрії паралельну серединній поверхні. При цьому:

*Уперше:*

- модифіковано варіаційний принцип Ху-Васідзу для виведення систем тривимірних диференціальних рівнянь в частинних похідних, що в рамках лінійної теорії пружності анізотропного тіла, описують деформування та динаміку товстостінних і стійкість нетонких анізотропних композитних циліндричних оболонок;

- зведено просторові системи диференціальних рівнянь до одновимірних з використанням процедури методу Бубнова-Гальоркіна, за якою всі функції напружень й переміщень розвиваються у подвійні тригонометричні ряди у коловому напрямку і вздовж твірної циліндричної оболонки;

- використано розроблені алгоритми і створені програмні комплекси для персональних комп'ютерів (ПК), розв'язано нові задачі про визначення характеристик напружено-деформованого стану товстостінних шаруватих анізотропних композитних циліндричних оболонок від зовнішньої силової дії;

- реалізовано використання розроблених алгоритмів і створених на їх основі комп'ютерних програмних комплексів для ПК щодо встановлення параметрів напружено-деформованого стану товстостінних анізотропних

циліндричних оболонок, виготовлених з композитного матеріалу, який захищений з боку високого температурного поля шаром функціонально-градієнтного матеріалу;

- розроблений алгоритм, в якому в єдиному процесі поєднані встановлення параметрів докритичного напружено-деформованого стану та розв'язання нових задач стійкості нетонких шаруватих анізотропних циліндричних оболонок;

- отримано нові дані про вплив кута повороту головних напрямків пружності матеріалу відносно координатних осей конструкції, при різних граничних умовах, геометрії та структурній будові оболонки, на її стійкість при дії осьового тиску, зовнішнього бокового тиску, дотичного зусилля, рівномірно розподіленого на торцях оболонки (кручення);

- встановлено, що при стисканні шаруватих оболонок з косоперехресним армуванням розрахункові критичні навантаження для нетонких анізотропних циліндричних оболонок можуть бути суттєво завищеними, якщо користуватись традиційною для оболонок із композитів моделлю ортотропного тіла;

- розроблені нові методики чисельного розрахунку характеристик деформування та стійкості дозволяють проводити структурну оптимізацію параметрів анізотропних циліндричних оболонок і в той же час отримувати дані, що не викликають ніяких сумнівів стосовно їх достовірності.

#### **4. Достовірність.**

Обґрунтованість основних наукових положень і отриманих результатів дисертаційної роботи Подворного А.В. забезпечується математичною коректністю постановки задач; співставленням отриманих результатів розв'язання задач з даними, що приведені в науковій літературі; застосуванням надійних і детально апробованих методів аналітичного та чисельного інтегрування при розв'язку однорідних і неоднорідних систем диференціальних рівнянь; збіжністю отриманих результатів при використанні чисельних методів та контролем їх точності.

#### **5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Результати роботи суттєво розширюють можливості методів будівельної механіки по розв'язанню просторових задач теорії анізотропних оболонкових конструкцій. Практичне значення представленої роботи полягає в розробці підходів і відповідних алгоритмів на основі тривимірних співвідношень лінійної теорії пружності, що представлені в обчислювальних програмних комплексах для ПК і використовуються для чисельних розрахунків задач деформування,

динаміки товстостінних і стійкості нетонких шаруватих циліндричних оболонок із матеріалів з однією площиною пружної симетрії. Реалізація задачі розрахунків параметрів деформування та стійкості при дії на циліндричні оболонки різноманітних видів статичного навантаження та температурного впливу. При цьому оцінено вплив на напружено-деформований стан, стійкість та частоти вільних коливань анізотропії композитного матеріалу, різних умов закріплення торців, шаруватості та геометрії циліндричних оболонок. Підходи та алгоритми, що реалізовані в програмних обчислювальних комплексах для ПК, впроваджено в ДП «Антонов» м. Київ, в Київському національному університеті будівництва і архітектури, в Національному університеті водного господарства та природокористування (м. Рівне) при виконанні держбюджетних тем згідно замовлень МОН України та проведенні навчального процесу.

## **6. Повнота викладення результатів дисертації в публікаціях**

За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 38 наукових праць, серед яких: чотири статті у фахових журналах, що входять до переліку, затвердженого ДАК України категорії “А”, з них – три у періодичному виданні, що індексується в наукометричній базі Web of Science інша в Scopus; п’ятнадцять статей у фахових журналах, що входять до переліку, затвердженого ДАК України категорії “Б”, сім статей у закордонних фахових журналах, з них – чотири у періодичних виданнях, що індексуються в наукометричних базах Scopus, віднесених до другого і третього кuartилів (Q2 та Q3); одинадцять публікацій у збірниках матеріалів та доповідей українських та міжнародних наукових конференцій та одна монографія, що видана у співавторстві.

Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідались і обговорювались на 11 українських та міжнародних наукових конференціях.

## **7. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи:**

1. У дисертаційній роботі автором не акцентована увага на тому, як може впливати конструктивна анізотропія матеріалу з якого вона виготовляється на напружено-деформований стан циліндричної оболонки?
2. Чому в дисертаційній роботі автором при запису модифікованого змішаного варіаційного принципу Ху-Васідзу був використаний саме такий розподіл на дві частини векторів напружень, деформацій та температурних дій?
3. Чому у роботі автором, при розв’язанні задачі про напружено-деформований стан, розглянуто лише чотири типи граничних умов і саме такі, а не інші?

4. В другому розділі дисертаційної роботи при розгляді напружено-деформованого стану циліндричних оболонок автор користується терміном «докритичний». Який сенс вкладається тут в цей термін?
5. Відомо, що фізико-механічні характеристики функціонально-градієнтного матеріалу під дією температури можуть змінюватися як за товщинною, так і за поздовжньою координатою. Тобто при такій дії, наприклад, напружений стан є просторовим. Тоді постає питання, чому у дисертаційній роботі автор використав зміни характеристики такого матеріалу лише за його товщиною?
6. В роботі відсутнє пояснення, чому отримана одновимірна система диференціальних рівнянь у випадку бокового стискання має дванадцятий порядок.
7. Чим зумовлена потреба рахуванні нескінченно малих сталей у п'ятому розділі при виведенні рівнянь, що описують стійкість циліндричних оболонок?
8. Як при розв'язанні задачі стійкості враховується нескінченність одновимірної системи однорідних диференціальних рівнянь?
9. Чи можливо узагальнити запропоновані автором методики та підходи визначення параметрів напружено-деформованого стану на випадки не лише колових циліндричних оболонок?

Ці зауваження не впливають на загальну позитивну характеристику дисертаційної роботи та не зменшують ступеня обґрунтованості й достовірності отриманих в ній результатів і висновків.

#### **8. Загальний висновок по дисертаційній роботі**

Дисертаційна робота Подворного А. В. «Деформування, динаміка та стійкість конструктивно анізотропних циліндричних оболонок в просторовій постановці» виконана на високому, сучасному науковому рівні. Вона є завершеною науково-дослідною роботою, присвяченою розв'язанню важливої науково-технічної проблеми будівельної механіки: визначення параметрів напружено-деформованого стану від силового та/або температурного впливу та вільних коливань товстостінних і стійкості нетонких циліндричних конструктивно анізотропних шаруватих оболонкових конструкцій на основі просторових співвідношень теорії пружності. Зміст реферату повністю відповідає тексту дисертації.

Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам п. 7-9 Постанови Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 про порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, а її автор Подворний Андрій



Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – Будівельна механіка.

Офіційний опонент  
завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка МОН України,  
член-кореспондент НАН України



Я.О. Жук

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР НАДЧ  
КАРАУЛЬНА Н.В.  
07.02.2024р.

